

TEKİL KAZIK TEMELLİ AÇIK DENİZ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN AVRUPA'DAKİ GELİŞİMİ

Baran Kaya¹, Elif Oğuz^{2,*}

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hidrolik Laboratuvarı

*ODTÜ, RÜZGEM, Rüzgar Enerjisi Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi

¹baran.kaya@metu.edu.tr, ²elifoguz@metu.edu.tr

ÖZET

Artan sera gazı salınımlarının doğayı tehdit etmesi, yakıt fiyatlarındaki ekonomik dalgalanmalar, rüzgar gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmıştır. Buna ek olarak, karada kurulu rüzgar türbinlerinde rastlanan olumsuzluklar, açık denizlerde rüzgar enerjisi santrali kuruluma uygun geniş alanların varlığı ve karaya kıyasla daha yüksek rüzgar enerjisi potansiyeli, sektörün açık denizlere yönelmesine neden olmuştur. Avrupa, açık deniz rüzgar enerjisinde mihenk taşı sayılabilecek yeniliklere öncülük etmiştir ve kurulu açık deniz rüzgar santrallerinin büyük çoğunluğu Avrupa'da bulunmaktadır. Tekil temeller; uygulama kolaylığı, üretim maliyetinin nispeten düşük oluşu, açık denizdeki petrol ve gaz santrallerinde birçok başarılı uygulamasının olması gibi etkenler nedeniyle açık deniz rüzgar enerjisinde kullanılan çeşitli temeller arasında %65 gibi önemli bir oranla dünyanın en çok tercih edilen temel türüdür. Bu çalışmada Türkiye gibi açık deniz rüzgar enerjisi sektörüne yeni girecek ülkelere kapsamlı bir bakış açısı kazandırmak ve bu konudaki teknik gerekliliklerin önemini vurgulamak amacıyla 1990-2019 yılları arasında Avrupa'da kurulan tekil kazık temelli açık deniz rüzgar santrallerindeki çevresel etkenler analiz edilmiş, temelde kullanılan teknolojik yenilikler ve gelişmeler değerlendirilmiştir.

1. GİRİŞ

Fosil yakıtlardan enerji üretmek, doğal dengeyi tehdit eden karbondioksit gibi gazların salınımlarında artışa neden olmaktadır [1]. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne ilişkin uluslararası bir anlaşma olan, 11 Aralık 1997'de, Japonya'da kabul edilen ve 16 Şubat 2005'te yürürlüğe giren Kyoto Protokolü, esas olarak bu zararlı gazların salınımlarının azaltılmasını amaçlamaktadır. Atmosferde bulunan zararlı gazların nedeni büyük ölçüde gelişmiş ülkelerde kurulu sanayi olduğundan, protokolün amaçlarını yerine getirmek, büyük ölçüde "ortak ancak farklılaştırılmış" ilkesi altında bu ülkelerin sorumluluğudur [2]. Bu sebeple, Birleşmiş Milletler, bu gazların salınımlarını azaltmayı ve küresel ısınmayla mücadeleyi amaçlayan Kyoto Protokolü'nü kabul etmiştir. AB, enerji ihtiyacının bir kısmını bu protokole uygun olarak yenilenebilir kaynaklarından üretmeyi planlamıştır. Yenilenebilir enerji; karbon salınımlarını azaltmak, enerji güvenliğini artırmak ve -birçok Avrupa ülkesi tarafından çok önemli konular olarak kabul edilen- iklim değişikliği ile mücadele gibi zorluklarla baş etmek için hayati önem taşımaktadır [1].

BM'nin bir parçası olan BM İklim Değişikliği Sekreterliği, insanlığın varlığını ve geleceğini tehdit eden konularda aktif olan BMİDÇS-Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin (UNFCCC-UN Framework Convention on Climate Change) kabul edilmesiyle beraber 1992 yılında kurulmuştur [3]. Sekreteryanın kurulmasından sonra topluluk, bugüne kadar amacına ulaşmak için birçok adım atmıştır. Kyoto Protokolü'ne rağmen, atmosferdeki sera gazı içeriği hızla artmaya devam ettiğinden 2009 yılında Kopenhag'da, Kyoto'ya alternatif bir anlaşmayla sonuçlanması amaçlanan bir konferans düzenlenmiş, ancak beklenen sonuca ulaşamamıştır. Bu zirvenin beklendiği gibi sonuçlanmamasının ve başarısız görülmesinin birçok nedeni vardır. Bu başarısızlığın ana nedeninin küresel iklimdeki tehdit edici değişikliklerin göz ardı edilmiş olduğu söylenebilir. Ancak o dönemde başarısız sayılan bu konferans Paris Anlaşması için temel hazırlamıştır. Kyoto Protokolünün aksine, 2015 yılında 196 partinin katılımıyla imzalanan Paris Anlaşması, bu yüzyılın ikinci yarısında sera gazı

salınımını sifıra indirme gibi uzun vadeli hedeflere sahiptir. Paris Anlaşması küresel iklim sorununu çözme amaçlı değildir. Bununla birlikte, bu anlaşma, küresel ısınma gerçeğini ve düşük karbonlu stratejilere geçmenin gerekli olduğunu tüm dünyaya göstermiştir [4].

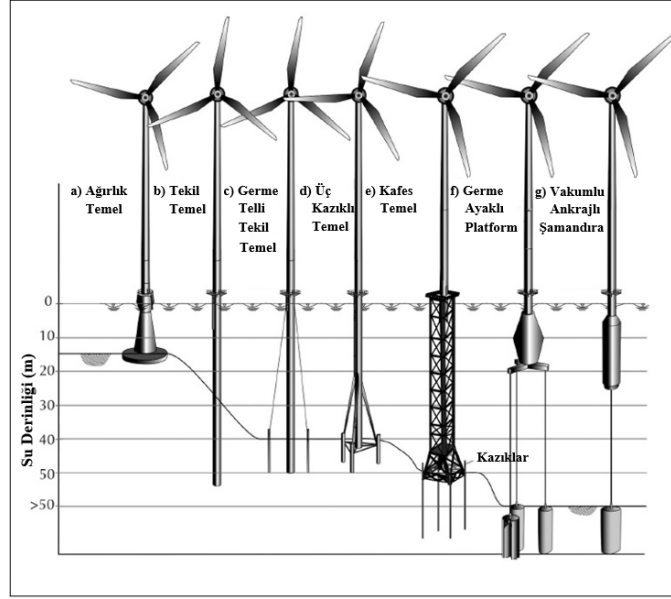
Enerji üretmek için yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynakların kullanılması, petrol fiyatlarındaki dalgalanmalara ve yüksek düzeyde zararlı gaz salınımına karşı etkili bir çözüm olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, bu kaynakların kullanımı yaygınlaşmasının fosil yakıtların kullanımını azaltacağı gerçeği bu kaynaklara yönelimin gerekliliğini bir kere daha vurgulamaktadır. Rüzgar enerjisinin maliyeti nispeten daha düşük olduğundan [5], 1800'lerin sonlarından bu yana enerji üretmek için yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi kullanılmaya başlanmıştır. 1990'larda, Danimarka, Almanya'daki Schleswig-Holstein ve İsveç'teki Gotland gibi yerlerde karada kurulu rüzgar türbinlerinden üretilen enerji miktarı, toplam enerji ihtiyacının %10'una ulaşmıştır [6]. Bu sebeple karada kurulu rüzgar türbinlerinin sektöre hâkim olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, karadaki bu büyüme, bir rüzgar türbininin büyük bileşenlerini taşıma zorluğu, görsel ve gürültü etkileri ile ilgili kısıtlamalar gibi bazı sorunları da beraberinde getirmiştir. Bu sorunlara bir çözüm olarak, açık deniz rüzgar enerjisine eğilim artmıştır. Açık denizlerde; yüksek rüzgar kalitesi, karaya kıyasla daha sürekli rüzgar hızı gibi önemli avantajlarla beraber son yıllardaki teknolojik gelişmeler açık deniz rüzgar enerji piyasasını hareketlendirmiştir. Ayrıca, rüzgar türbinlerinin açık denizlerde kurulumu, karada kurulu rüzgar türbinlerinin görsel kirlilik ve gürültü gibi bazı olumsuz etkilerini ortadan kaldırmaya yardımcı olmaktadır. Öte yandan, açık deniz rüzgar türbinleri, yüksek işletme ve bakım maliyetleri, yük büyüklüğü, zorlu hava koşulları, karmaşıklık ve destek yapısının tasarım süreci ile ilgili belirsizlikler gibi bazı dezavantajlara sahiptir [6,7]. Buna ek olarak, karaya kurulu rüzgar türbinlerine kıyasla daha büyük destek yapıları gerektirmesi, karayla bir elektrik şebekesi kurmak için su altı kabloları, kurulum ve bakım için özel gemiler kullanılması gibi faktörler sebebiyle açık deniz rüzgar türbinlerinin maliyetleri 2-3 kat daha yüksektir [8]

Bir rüzgar santralının ömrü boyunca yürütülen birkaç aşama vardır [9]. Bunlar başlıca:

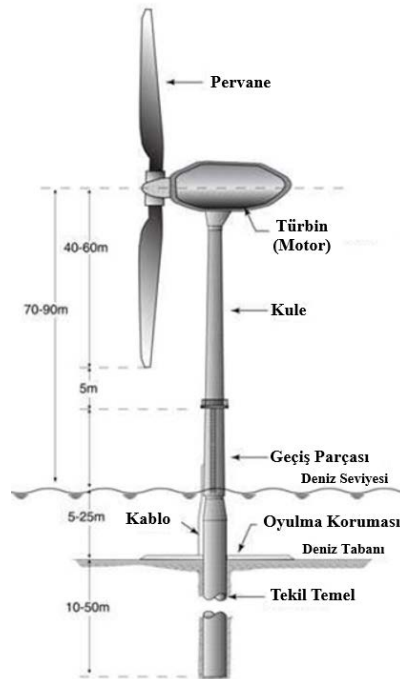
- Proje geliştirme ve onay,
- Türbin tasarımı ve imalatı,
- Kurulum ve işletmeye alma,
- İşletme ve bakım,
- İşletmeden çıkarma ve sökme işlemleridir.

Açık deniz rüzgar türbinleri için sabit tipler (ağırlık temel, tekil kazık temel, vakumlu kova keson temel, üç kazıklı temel, kafes tipi temel) ve yüzer tipler (spar tipi platform, germe ayaklı platform vb.) olmak üzere iki tip destek yapısı kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları Şekil 1'de gösterilmiştir [10]. Bunların içinden, tekil (kazıklı) temeller, şu anda açık deniz rüzgar türbinlerinde en çok kullanılan destek yapılarıdır. Bunun sebebi olarak, kurulumlarının basit olması, imalat maliyetlerinin nispeten düşük oluşu ve açık deniz petrol ve gaz yapılarındaki başarılı uygulamaları gösterilebilir [11].

Tekil kazık temelli açık deniz rüzgar türbini bileşenlerinin yaygın kullanım boyutları Şekil 2'de gösterilmiştir. Tekil kazık temeller, silindirik şeklindeki geniş çaplı çelik kazıkların forajla veya titreşimli çekiçler yardımıyla deniz tabanına çakılmasıyla kurulan destek yapılarıdır [12]. Fakat, deniz tabanının çok sert olması durumunda, deniz yatağı, delme ekipmanı kullanılarak kazık çapından biraz daha geniş delindikten sonra tekil temel yerleştirilir [13]. Genellikle, 5-6 m çapında kazıklar kullanılır [12]. Ancak, 60 m'ye kadar su derinliğinde, 10 m'ye kadar olan çaplar için tekil kazık temellerin uygulanabilir olduğu önerilmektedir [14]. Açık deniz rüzgar türbinlerindeki teknolojik gelişmelerle beraber, 2010 yılından bu yana, 6 m'den daha büyük çaplı tekil kazık temeller üretilmeye başlanmış ve son olarak Rentel rüzgar santralinde 8 m çapında tekil kazık temeller kullanılmıştır.



Şekil 1. Destek Yapısı Çeşitleri [10]

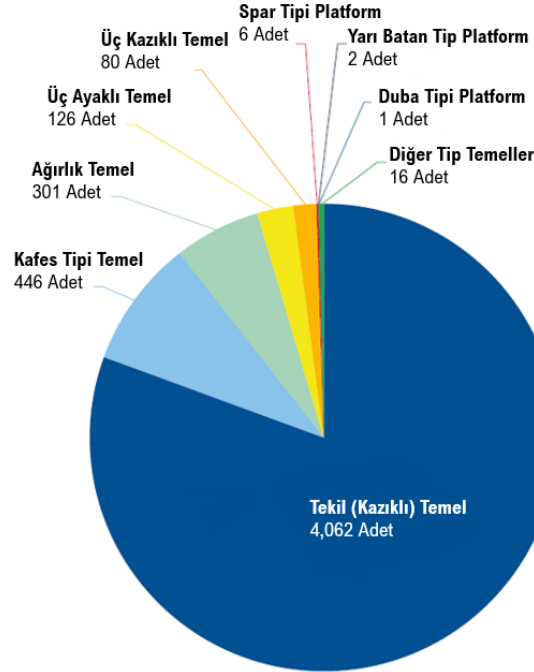


Şekil 2. Tekil Kazık Temelli Açık Deniz Rüzgar Türbin Sistemi Bileşenleri [10]

Tekil kazık temelli türbinler genellikle sığ su derinliklerinde (20-40 m) kullanılır [15]. Ancak, 30-40 m su derinliklerinde, çok esnek olabileceğinden, tekil temeller yanıl olarak çelik tellerle desteklenir ya da daha ekonomik bir alternatif olarak düşünölebilecek üç kazıklı veya kafes tipi temeller kullanılabilir [7].

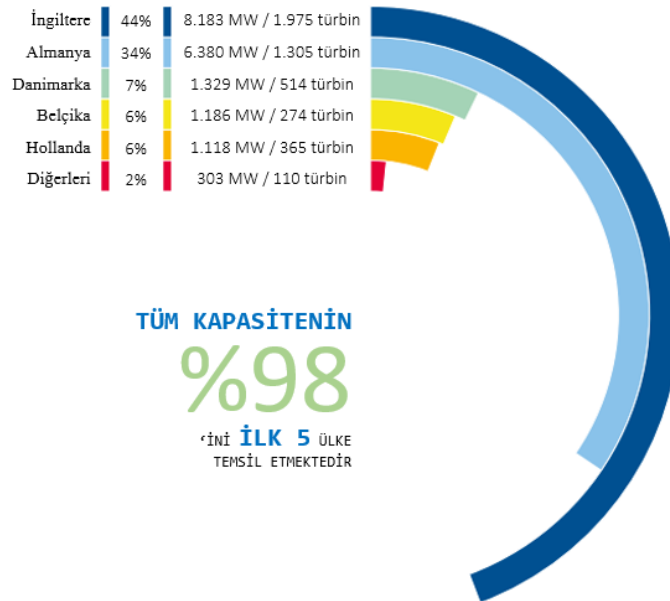
2017'nin sonuna gelindiğinde, Avrupa'daki açık deniz rüzgar türbin kurulumları, yaklaşık %84'lük bir oranla tüm dünyadaki kurulumların büyük bir çoğunluğunu oluşturuyordu [16,17]. Buna ek olarak, Şekil 3'te gösterildiği gibi 2018'in sonunda Avrupa'da %81,9'luk kurulum yüzdesine ulaşan tekil kazık temeller en yaygın tip olma niteliğini taşımaktadır [5,18]. Avrupa kıta sahanlığının yapısı dolayısıyla sığ su derinliklerinde kurulum açısından en uygun destek

yapısı olan tekil temeller daha yaygın olarak kullanılmıştır. Buna ek olarak, özellikle kum ve çakıldan oluşan Avrupa deniz tabanında tekil temel montajının nispeten daha kolay olması tekil temelleri diğer temel tiplerine göre daha ekonomik kıldığı için bu tip temeller çok daha yaygın bir şekilde tercih edilmiştir [5].



Şekil 3. 2018 yılının sonunda sayılarına göre Avrupa'daki destek yapısı tipleri [18]

2018 yılı sonunda, Avrupa'da açık deniz rüzgar türbinlerinden elde edilen rüzgar enerjisi, 4.543 rüzgar türbini ile 18.499 MW'a ulaşmıştır. İngiltere, toplam 1.975 türbinle 8.183 MW'a ulaşmıştır ve bu alanda %44'lük bir oranla kurulu açık deniz rüzgar gücü kapasitesi alanında Avrupa'da liderdir. İngiltere'yi %34'le Almanya takip etmektedir ve sırasıyla Danimarka, Belçika ve Hollanda izlemektedir. 2018'in sonunda Avrupa ülkelerinde ulaşılan toplam kurulu yüzdelik oran, toplam kurulu kapasite ve toplam açık deniz rüzgar türbini sayıları Şekil 4'te gösterilmiştir [18].



Şekil 4. 2018 yılının sonunda Avrupa ülkelerinin toplam yüklü kapasite ve türbin sayıları [18]

Gelişmekte olan ülkelerden biri olan Türkiye’de artan nüfusla beraber enerji ihtiyacı yıllık %8 oranında artmaktadır [19]. 1998 yılında karada kurulan ilk rüzgar türbini uygulamasından sonra, şu anda rüzgardan enerji üretimi tüm enerji üretiminin %6.78’ine ulaşmıştır [20]. Ancak, Türkiye’nin de diğer Avrupa ülkeleri gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir kaynaklardan enerji üretimiyle ilgili belirlediği hedefleri vardır. Türkiye’nin üç tarafını çevreleyen denizlerde görülen rüzgar hızları, Türkiye’deki açık deniz rüzgar enerjisi potansiyelini açıkça göstermektedir. Satır ve Malkoç’a göre, Türkiye’deki açık deniz rüzgar potansiyeli 10.463 MW olarak belirtilmiştir [21,22]. Türkiye için bir açık deniz rüzgar türbini geliştirmeden önce gerekli mevzuatın belirlenmesi ve hesaplar için gerekli olan tüm verilerin İngiltere’de olduğu gibi bir kurumda toplanması önemlidir. Ayrıca, her bir yenilenebilir enerji sisteminin belirli bir yer için tasarlanması gerektiğinden, Türkiye’deki açık deniz rüzgar türbini kurulumu için en uygun bölgeleri belirlemek amacıyla araştırmacılar tarafından çok sayıda fizibilite çalışması yapılmıştır. Türkiye için yapılan bu fizibilite çalışmalarına göre, İğneada, Gökçeada, Bozcaada, Baba Burnu, Alanya, Anamur, İskenderun, Akıncı Burnu ve Saros gibi yerler açık denizde rüzgar türbini kurulumu için en uygun yerler olarak belirlenmiştir. Türkiye’nin Ege Denizi kıyıları göz önüne alındığında, açık deniz rüzgar çiftliği kurmak için uygun yerlerden biri olarak seçilen Bozcaada’da, su derinlikleri 20-30 m civarındadır ve bu su derinlikleri için en uygun destek yapıları sabit tiplerdir [21]. Tekil temellerin Avrupa’da yaygın oluşu sebebiyle, Türkiye’de kurulacak muhtemel ilk açık deniz rüzgar türbinin de bu tip bir destek yapısının tercih edileceği düşünülmektedir. Bu amaçla Türkiye, Stratejik Sektör İşbirliği Programında, Danimarka, Almanya, İngiltere gibi Avrupa ülkeleriyle son zamanlarda bir dizi projede yer almaya başlamıştır. Enerji üretiminin yaklaşık yüzde 40’ını rüzgardan sağlayan ve açık deniz rüzgar enerjisi sektöründe dünya liderlerinden biri olan Danimarka, Stratejik Sektör İşbirliği Programı kapsamında Türkiye ile ikili projeler sürdürmektedir. Bu iş birliğini güçlendirmesi beklenen açık deniz rüzgar enerjisi projelerini görüşmek üzere Mart 2019’da Ankara’da bu konuda ilk toplantı yapılmıştır. Bu toplantıda, özellikle açık deniz rüzgar enerjisi sektöründe uzun yıllardır yer alan, planlama ve proje geliştirme alanlarında birçok deneyim kazanmış olan Danimarka, ilgili politikaların, stratejilerin ve çözümlerin geliştirilmesinde bilgilerini ve deneyimlerini paylaşmıştır [23]. Konuyla ilgili henüz başlangıç aşamasında olan önemli bulgular Danimarka Enerji Ajansı başkanı tarafından toplantıda yetkililerle paylaşılmıştır. Rüzgar verilerinin güvenilirliği ve dönemsel belirsizliği ile ilgili risklerin yanısıra batimetri haritalarının önemi ajans başkanı tarafından vurgulanmıştır. Türkiye’de açık deniz rüzgar enerjisi için uzun vadeli bir planlamaya ihtiyaç duyulduğundan, açık deniz rüzgar enerjisinin gelişimi ile ilgili teknik uzmanlık ve vasıflı işgücünün mevcudiyeti açısından, bu çalışmada Avrupa’daki bütün tekil kazık temelli açık deniz rüzgar türbinleri ve kurulum aşamalarında kazanılan tecrübelerinin gözden geçirilerek özetlenmesi amaçlanmıştır. Türkiye’de son zamanlarda gündeme gelen bütün bu enerji politikaları göz önüne alındığında, bu çalışma, özellikle Türkiye gibi açık deniz sektörüne yeni adım atacak olan ülkeler için kapsamlı bir inceleme sağlamak amacıyla tüm kurulumları gözden geçirmeyi amaçlamıştır. Avrupa’daki bütün tekil kazık temelli açık deniz rüzgar türbinleri aşağıda sunulmuştur.

2. AVRUPA’DAKİ GELİŞMELER

2.1 1990’LAR

Dünyanın ilk açık deniz rüzgar türbini, 220 kW kapasiteli Nøgersund, kıyından 250 m açıkta 7 m su derinliğinde 1990 yılında İsveç’te kurulmuştur [8,13,24]. Bu rüzgar türbini üç adet düşey kazıktan oluşan ve tasarımı kafes tipi temellere dayanan üç kazıklı temel üzerine kurulmuştur. Ancak, ilerleyen yıllarda ağırlık temel tiplerinin sığ ve sakin sular için daha elverişli oluşu ve tekil kazık temelli destek yapılarının kolay kurulumu, petrol ve doğalgaz sektöründeki başarılı uygulamaları sebebiyle bu destek yapıları üç kazıklı temel tiplerinin yerini almıştır [25]. Nøgersund 1998 yılında devreden çıkarılmış [6] ve 2008 yılında sökülüştür [8,13,24].

Vindeby, 450 kW üretim kapasiteli 11 rüzgar türbiniyle, dünyanın ilk açık deniz rüzgar santrali olma özelliğini taşımaktadır. 1991 yılında Danimarka’da kurulan bu türbinler ağırlık temellerle

desteklenmekteydi. Yıllık 12 GWs/yıl güç üreten bu proje açık denizde rüzgar verisi elde etmek ve türbinlerin açık denizdeki performansını incelemek için kullanılmaktaydı [8,13,24]. 2016 yılında, ömrünü tamamlamış olan rüzgar santrali işletmeden çıkarılmış; 2017 yılında sökülüştür (Bkz. Şekil 5) [26].



Şekil 5. Dünya'nın ilk açık deniz rüzgar santralini (Vindeby, Danimarka) söküm çalışmaları [26]

Dünyada tekil kazık temellerle desteklenen ilk açık deniz rüzgar santrali 1994 yılında Hollanda'da kurulan Lely rüzgar santralidir. Kurulumundan 22 yıl sonra meydana gelen olayda türbinlerden birinin pervane başı ve kanadı metal yorgunluğu nedeniyle kırılmış ve suya düşmüştür. Bu olay sonucunda, beklenen ömrünü tamamlamaya yaklaşan rüzgar türbinlerini sökme kararı alınmıştır. 3 hafta süren çalışmalar sonunda yüzer vinçler ve römorkörlerle tamamen sökülüştür [6].

Lely'nin kurulumundan 2 yıl sonra, 600 kW kapasiteli 28 adet rüzgar türbininden oluşan Irene Vorrink rüzgar santrali 1996 yılında Hollanda'da kurulmuştur [24,27]. Denizde kurulanların aksine, Hollanda'da kurulan bu iki santral Lake IJsselmeer isimli gölde kurulmuştur [13].

1998'den beri İsveç'te faaliyet gösteren Bockstigen rüzgar santralinde destek yapısı olarak kullanılan tekil kazık temeller deniz tabanının delinmesiyle açılan kuyulara oturtulmuştur. Bu yöntemle monte etme işlemi ilk defa bu santralde kullanılmıştır. Santralin enerji üretim kapasitesi başlangıçta 5 adet Wind World 550 kW türbinle 2.75 MW iken (Bkz. Şekil 6), 2014 yılında Momentum Gruppen A/S rüzgar santralini satın aldıktan sonra ve 20. yıl sonunda eski türbinleri 2018'de Vestas V47 660kW türbinler ile değiştirilerek santralin kapasitesi 3.3 MW'a yükseltilmiştir. Öte yandan, türbinleri yenilemek onarmaktan daha maliyetli olmasına rağmen, yeni türbinler eski türbinlerden iki kat daha fazla enerji sağlayacağı için firma türbinleri değiştirme yoluna gitmiştir [24,28]. Bu projede kullanılan tekil kazık temellerin, 43 tonluk düşük ağırlığı ve 2.25 m ile nispeten küçük çaplı olması nedeniyle kolaylıkla sahaya taşınmış ve önceden açılan deliğe oturtulmuştur. 2.4 m çapında ve 10 m derinliğindeki temel delikleri, deniz tabanındaki kayayı bir mavna ile delerek oluşturulmuştur. Delme işlemi bittikten sonra temeller deliğe yerleştirilmiş ve kaya ile arasındaki boşluklar özel bir beton ile doldurularak temeller sabitlenmiştir. Teknik ve planlama problemleri nedeniyle kurulum süreci bir süre uzamıştır. Teknik problem, su altı kablosunun sabitlenmesiyle ilgiliydi ve bunun nedenleri su akımlarının beklenenden daha büyük olması ve kablunun sabitlenmesinin zorluğunun küçümsenmesiydi. Bu sorunu gidermek için öncelikle kablo üzerine beton çuval yerleştirilerek ağırlık oluşturulmuş ve ardından kablo 12 mm çelik kancalarla tutturulmuştur. Her iki girişim de hayal kırıklığı ile sonuçlanmıştır. Ancak, kablolar 25 mm U şeklinde kancalarla bağlandığında başarılı olmuştur. Planlama tarafında ise, temel deliğini açmak için kullanılan mavnanın kurulum sahasına gecikmesi ve dalga yüksekliği, sığ sulara ulaştığında yükseldiği için dalga yüksekliğinin tahmin

edilenden daha yüksek olması büyük bir problem teşkil etmekteydi. Dalga yüksekliği kritik bir faktördür çünkü tekil kazık temeller deliklere yerleştirilirken dalgalara karşı çok hassastır. Ancak ne yazık ki, kabloları sabitleme sorununu çözme kışa kadar sürmesi ve kurulum sürecindeki yanlış planlama nedeniyle yaşanan gecikmeler maliyeti %10 artırmıştır. Bu projenin tüm aşamaları boyunca kazanılan bilgi ve tecrübenin gelecekteki projelerin daha düşük maliyetlerle inşa edilmesi için faydalı olacağı düşünülmektedir. Bockstigen rüzgar türbinlerinin maliyet/enerji üretim oranı önceki açık deniz rüzgar türbinleri Vindeby ve Tunø Knob ile karşılaştırıldığında, Bockstigen'den yaklaşık %50-80 daha pahalı oldukları açıkça görülmektedir. Ayrıca, Vinkompaniet tarafından karada inşa edilen rüzgar santralinin maliyet/enerji üretim oranının, Bockstigen'den %15-20 daha düşük olması, açık deniz rüzgar türbinlerinin gelişen teknolojiyle beraber karaya kurulan rüzgar türbinlerine karşı yüksek maliyet probleminin giderek azalmaya başladığını göstermektedir [28].



Şekil 6. Bockstigen açık deniz rüzgar santrali [28]

1990'larda, teknoloji bugünlerde olduğu kadar gelişmiş değildi ve sadece birkaç ülke açık deniz rüzgar enerjisi ile ilgilendiği için teknoloji yavaş geliyordu; bu nedenle az sayıda açık deniz rüzgar santrali kurulmuştur (bkz. Tablo 1). Ayrıca, destek yapılarının ve şebeke bağlantılarının yüksek maliyetli imalat ve montaj işlemleriyle beraber santralin işletme ve bakım maliyetleri de yüksek olduğundan, kıyıda onlarca kilometre uzağa rüzgar türbinleri kurmak pek makul görünmüyordu. Buna ek olarak, tasarım teknolojileri yeterince gelişmediği için, o günlerde 10 metreden daha fazla su derinliğinde kurulu açık deniz rüzgar santrali bulunmamaktaydı.

Tablo 1. 1990'lı yıllarda Avrupa'da kurulan tekil kazık temelli açık deniz rüzgar santralleri

Rüzgar Santrali, İşletmeye Alındığı Yıl [24]	Ülke [24]	Türbin Kapasitesi (MW) [24]	Toplam Kapasite (MW) [24]	Kazık Çapı (m)	Kazık Ağırlığı (t)	Kıyıya Mesafe (km)	Su Derinliği (m)
Nogersund, 1990	İsveç	0.22	0.22	(üç kazıklı)	-	0.25 [8]	7 [8]
Vindeby, 1991	Danimarka	0.45	4.95	(ağırlık temel)	-	1.80 [5]	2.5-5 [29]
Lely, 1994	Hollanda	0.5	2	3.2-3.7 [27]	89 [30]	0.80 [30]	5-10 [30]
Irene Vorrink, 1996	Hollanda	0.6	16.8	3.515 [31]	-	1.00 [5]	1-2 [29]
Bockstigen, 1998	İsveç	0.66	3.3	2.25 [28]	43 [28]	4.00 [28]	6 [28]

1990'lı yıllarda Avrupa'nın, 2010 yılı sonunda 2500 MW kurulu açık deniz rüzgar enerjisi kapasitesine ulaşılması planlanmıştır [32].

2.2 2000'LER

1990'larda kurulan açık deniz rüzgar türbinlerinden kazanılan deneyimler ve gelişen teknoloji ile daha büyük ölçekli rüzgar santralleri kurulmaya başlanmış ve açık deniz rüzgar enerjisi ile ilgilenen ülkelerin sayısında artış olmuştur.

Utgrunden rüzgar santrali 7 adet 1.5 MW rüzgar türbininden oluşmaktadır ve megavat sınıfı rüzgar türbinlerinin kullanıldığı ilk rüzgar santralidir. Bu projede, geçiş parçasını ve tekil temeli birbirine bağlamak için ilk kez açık deniz rüzgar enerjisinde bir derz eklemi kullanılmıştır. Yumuşak-yumuşak tasarım konsepti ilk kez bu açık deniz rüzgar santralinde kullanılırken, önceki santrallerde nispeten daha ağır tekil kazık temel kullanımını gerektiren yumuşak-sert tasarım konsepti kullanılmıştır. Yumuşak-yumuşak tasarım konsepti, daha az ağırlığa sahip daha küçük çaplı tekil kazık temeller kullanmayı mümkün kılar ve çok az bile olsa geçiş parçasının ve kulenin boyutlarını azaltır. Ayrıca, imalat ve kurulum kolaylaşır ve boyutlardaki azalma nedeniyle destek yapısına etki eden yükler azalır. Bununla birlikte, temelin hassas bileşimi nedeniyle, genel dinamik davranışa, toprak koşullarına duyarlılığa ve dalga tahriklerine daha fazla önem vermek gerekir. Kurulumdan 5 yıl sonra yapılan kontrollerde çatlak veya kusur olmadığı gözlemlenmiştir. Bu sayede, derz eklemine geçiş parçası üzerindeki yükleri temele iletmede başarılı olduğu kanıtlanmıştır [33].

2000 yılında kurulan Blyth, İngiltere'nin ilk açık deniz rüzgar santralidir. İngiltere, bu proje ile açık deniz rüzgar enerjisi sektörüne girmiştir. Kıyıya 800 m uzaklıkta ve 6-11 m arasında değişen su derinliklerinde foraj deliklerine oturtulan tekil temeller üzerine monte edilen 2 adet 2 MW'lık türbinden oluşmaktadır [25].

Yttre Stengrund rüzgar santrali 2001 yılında İsveç'te kurulmuştur. Her biri 2 MW kapasiteli beş türbinden oluşan santral 10 MW güç üretim kapasitesine sahipti. Deniz tabanının birkaç metrelik kohezyonsuz kum tabakasıyla kaplı kayadan oluşması nedeniyle temellerin montajından önce kayayı delmek ve kumun foraj deliklerini doldurmasını engellemek gerekiyordu [25]. Teknik ve finansal gerekçeler nedeniyle türbinleri yenileriyle değiştirmek yerine, rüzgar santralinin kullanımdan kaldırılmasına karar verilmiştir. Bu rüzgar santralinin hizmetten çıkarılması 2015 yılında başlamış ve 2016 yılında deniz kablolarının sökülmesiyle beraber tümüyle tamamlanmıştır [34].

Kuzey Denizi'nin Danimarka sularında 2002 yılında inşa edilen Horns Rev 1 rüzgar santrali, dünyanın ilk büyük ölçekli açık deniz rüzgar santrali (bkz. Şekil 7) olma özelliğine sahiptir. Kıyıdan 14-20 km uzaklıkta bulunan bir alanda kurulan 80 adet rüzgar türbini deniz tabanına çakılarak sabitlenmiş tekil temeller üzerine monte edilmiştir. Horns Rev 1 rüzgar çiftliğinin inşasıyla beraber, açık deniz rüzgar enerjisi sektörü, Elsam Engineering A/S tarafından tasarlanan ve geliştirilen Rüzgar Çiftliği Ana Kontrol Cihazı olarak adlandırılan yeni bir teknolojiyle tanışmıştır. Bu cihaz, rüzgar santralinin 80 ayrı jeneratör yerine tek bir jeneratör olarak çalışmasını sağlamak için tasarlanmıştır [35].



Şekil 7. Büyük bir alanı kaplayan Horns Rev 1 rüzgar santrali [35]

Danimarka'da bulunan Frederikshavn, tüm enerji ihtiyaçlarını yenilenebilir enerji kaynaklarından üretmeyi hedefleyen ve kıyılarında açık deniz rüzgarından enerji üretilebilecek geniş alanlara sahip olan bir şehirdir [36]. Bu amaçla 2003 yılında Frederikshavn rüzgar santrali, ikisi 3 MW, diğer ikisi ise 2.3 MW kapasiteli 4 türbin ile inşa edilmiştir. Bu rüzgar çiftliğinde, üç adet tekil kazık temel ve bir adet tekil-kova tipi temel test amacıyla bir arada kullanılmış [37] ve bu kullanım, santralin sahibine bu iki temel tipini kıyaslama şansı vermiştir [25].

Danimarka'da Samsø adlı bir ada, tüm enerji ihtiyaçlarını yenilenebilir enerji kaynaklarından elde etmeyi hedefliyordu. Bu amaç doğrultusunda, her biri 2.3 MW kapasiteli 10 rüzgar türbini 4.5 m çapında ve 300 ton ağırlığındaki tekil temeller üzerine monte edilerek, 2003 yılında adayla aynı adı taşıyan bir açık deniz rüzgar santrali inşa edilmiştir. Kıyıya nispeten yakın bir yerde, 3.5 km açıktaki kurulmasına rağmen, su derinliği, 20 m ile önceki rüzgar santrallerinden daha derindi [25].

İrlanda'daki ilk açık deniz rüzgar santrali olan ve 2003 yılında kurulan Arklow Bank rüzgar santrali 26 m su derinliğine ulaşarak Samsø rüzgar santralinde kırılan rekoru geçmiştir. Bu rüzgar santralinde, o sırada en büyük kapasiteye sahip olan 3.6 MW kapasiteli rüzgar türbinleri, üretilen en geniş çapa sahip 5.1 m çapında tekil temeller üzerine oturtulan türbinlerden oluşmaktadır. 100 m'ye kadar uzayabilen ana kaldırma koluna sahip ve 5.5 m çapa kadar kazıkları tutma kapasitesi olan, dünyanın en ağır çekiçlerinden biri olan Jamping Jack kullanılarak deniz tabanına çakılmıştır. Bu rüzgar santralinin ikinci aşaması inşa edildiğinde, toplam kapasite 520 MW'a ulaşacaktır [25].

North Hoyle rüzgar santrali, İngiltere için açık deniz rüzgar enerjisi alanında bir dönüm noktasıdır [38]. Bu rüzgar santrali 2003 yılında kurulmuş ve her biri 2 MW kapasiteli toplam 30 adet rüzgar türbininden oluşmaktadır. İngiltere'deki ilk büyük ölçekli açık deniz rüzgar santrali olma özelliğini taşıyan proje İngiltere'nin 1. raunt olarak adlandırdığı projelerden biridir. Bu raunttaki projeler enerji üretiminin yanında, gelecekteki projeler için faydalı olacağı düşünülen bilgi ve deneyimler kazanmak üzere tasarlanmıştır [39]. Temeli deniz tabanına sabitlerken hem çakma hem de foraj tekniği kullanılmıştır. Tekil temeller deniz tabanının üst ve yumuşak kısmı olan kum ve kil tabakasına çakılarak yerleştirildikten sonra daha önce alttaki kaya tabakasında açılmış olan deliğe yerleştirilmiştir [38].

Scroby Sands rüzgar santrali kıyıdan 3.6 km uzaklıkta ve 5-10 m arasında değişen su derinliklerinde kurulmuştur [39]. 4.2 m çapında ve 200 ton ağırlığındaki tekil kazık temeller üzerine kurulu her biri 2 MW kapasiteli 30 türbinden oluşmaktadır [30]. Bu rüzgar santrali, İngiltere kıyılarının en büyük kum yığınlarından biri olan Scroby Sands adlı bir kum yığını üzerine inşa edilmiştir. Kum yığınının şekli, boyutu ve yüksekliği; gelgit akıntılarının, dalgaların, denizdeki kabarmaların birleşik etkileri nedeniyle değişkenlik gösterebildiğinden türbinleri bir kum yığınının üzerine kurmak zorlayıcı bir işti [40]. Oyulma korumasına rağmen, koruma bölgesinin etrafında, beklenmedik şekilde ikincil oyulmaların oluştuğu gözlenmiştir [41,42]. Bu nedenle, oyulma korumasının tasarımında oyulma çukurları ve girdaplar gibi ikincil etkilerin göz önünde bulundurulması CEFAS (2006) tarafından önerilmektedir. Bu etkiler fazladan yük getirebilir veya deniz tabanındaki yanal desteği azaltabilir [42]. Bu rüzgar santralinde, su altından gelen kabloların karaya bağlandığı noktada üç adet geçiş bağlantısı bulunmaktadır. Bu geçiş bağlantılarından biri arızalandığında, devrelerden biri onarım çalışmaları nedeniyle kapatıldığından rüzgar santralinin kapasitesi önemli ölçüde azalır. Bu tür bir üretim kaybını önlemek için, olası bir arıza durumunda derhal değişim yapabilmek için sahada yedek geçiş bağlantıları mevcuttur [43].

2007 yılında, Egmond aan Zee açık deniz rüzgar santrali, Kuzey Denizi'nin Hollanda kıyılarında 10-18 km açıktaki ve 15-19 m arasında değişen su derinliklerinde enerji üretmeye başlamıştır. Pilot proje olarak inşa edilen bu rüzgar santralindeki amaç, açık deniz rüzgar santrallerindeki çevresel etkiler nedeniyle ortaya çıkan zorlukları araştırmaktır. Bu araştırmaların bir parçası

olarak, Egmond'un kurulumundan sonra liman yunuslarının sayısındaki değişiklikleri görmek için bir çalışma yapılmıştır. Kurulumdan bir yıl önce ve rüzgar santralini işletimi sırasında iki yıl boyunca, karşılaştırma yapmak için seçilen iki farklı alanda ve rüzgar santralini kurulu olduğu alanda, akustik olarak gözlem yapabilen T-POD'lar kullanılarak yunusların sayısı gözlenmiştir. Bu çalışmanın sonunda, santral alanındaki yunus sayısında ilginç bir artış gözlenmiştir ve bu artışın sebebi kesin olarak bilinmemektedir. Bununla birlikte, rüzgar santralini inşasından sonra beslenme ve barınma için uygun yerlerin artmasının, inşaat alanındaki yunusların sayısında bir artışa neden olabileceği düşünülmektedir [44].

Princess Amalia rüzgar santralinde, her biri 2 MW gücünde toplam 60 rüzgar türbini bulunmaktadır [45]. Kıyıdan 23 km uzaklıkta ve 19-24 m su derinliği aralığında kuruludur, yani zamanının en uzakta ve en derinde kurulan açık deniz rüzgar santrali olma niteliğini taşımaktadır. Göçmen kuşları korumak ve Hollanda kıyılarında görsel kirlilik yaratmamak için bu kadar uzakta ve derinde inşa edilmiştir [46]. Egmond aan Zee rüzgar santralini kurulumundan sonra liman yunusu sayısında artış görülmesine rağmen, açık deniz rüzgar santrallerinin inşası sırasında gürültülü çalışmalar sebebiyle bölgedeki liman yunuslarının sayısındaki düşüş daha önce yapılan deneysel çalışmalarda kanıtlanmıştır. Ancak, Egmond aan Zee rüzgar santralini yaklaşık olarak 10 km batısında kurulan bu rüzgar santralinde yapılan kazık çakma ve türbinlerin kurulması gibi gürültülü çalışmalar Nisan 2007'de tamamlandığından ve rüzgar santrallerinin liman yunusu sayısına etkilerini araştıran çalışmaya bu tarihten sonra ikinci akustik izleme dönemi ile devam edildiğinden, bu durumun yunus sayısındaki artışın sebeplerinden biri olabileceği düşünülmektedir [44].

Her ne kadar Almanya kıyıları açık deniz rüzgar enerjisi için uygun bir potansiyele sahip olsa da batı ve kuzey kıyılarının çoğunun çevresel koruma altında olmasından, Baltık Denizi kıyılarının turizm amaçlı ve deniz taşımacılığında yoğun olarak kullanılmasından kaynaklanan sınırlamalar açık deniz rüzgar enerjisi potansiyeli olan bölgeleri azaltmıştır. Bu nedenle, bazı projeler üzerinde çalışılmasına rağmen, hiçbir gerçekleşmemiş ve 1990'lı yıllarda hiçbir açık deniz rüzgar santrali kurulmamıştır [32].

Almanya'nın ilk açık deniz rüzgar santrali 2009'da kurulan Alpha Ventus'tur [32]. 6'sı üç kazıklı, 6'sı kafes tipi temeller üzerine oturtulmuş her biri 5 MW üretim kapasitesine sahip toplam 12 türbinden oluşan bu küçük rüzgar santrali, Kuzey Denizi'ndeki Borkum Adası'na 45 km uzaklıkta 4 km²'lik bir alana kurulmuştur [47]. Yapılan bazı gözlem çalışmalarında, santralin inşasından sonra bu bölgenin deniz tabanında bazı anemon, yengeç ve istiridye kolonileri büyümeye başladığı görülmüştür [24].

Lynn ve Inner Dowsing rüzgar santralleri, 2009 yılında birbirine bitişik olarak İngiltere'de inşa edilmiştir. Her biri 3.6 MW gücünde toplam 54 rüzgar türbini, hidrolik çekiç yardımıyla deniz tabanına çakılan tekil kazık temeller üzerine inşa edilmiştir. Bu iki rüzgar santrali, 2003 yılında iki ayrı deneyimli şirket tarafından ayrı ayrı tasarlanmış ve onaylanmıştır. Barrow açık deniz rüzgar santralini kurulmasıyla beraber bu konuda tecrübe kazanan ve İngiltere doğalgaz endüstrisinde tanınmış bir firma olan Centrica, projeyi 2008 yılında satın almış ve inşa etmiştir. Bu iki rüzgar santralini kurulumuyla birlikte Birleşik Krallık, toplam 598 MW kurulu açık deniz rüzgar gücüne ulaşarak deniz rüzgarından enerji üreten ülkeler arasında lider olmuştur [48].

2000'lerde Avrupa'da kurulan tüm tekil temelli açık deniz rüzgar santralleri Tablo 2'de görülebilir.

Tablo 2. 2000'li yıllarda Avrupa'da kurulan tekil temelli açık deniz rüzgar santralleri

Rüzgar Santrali, İşletmeye Alındığı Yıl [24]	Ülke [24]	Türbin Kapasitesi (MW) [24]	Toplam Kapasite (MW) [24]	Kazık Çapı (m)	Kazık Ağırlığı (t)	Kıyıya Mesafe (km)	Su Derinliği (m)
Utgrunden, 2000	İsveç	1.5	10.5	3-3.65 [33]	110-165 [33]	8 [13]	7-10 [13]
Blyth, 2000	İngiltere	2	4	3.5 [31]	120 [49]	0.8 [13]	6-11 [13]
Y. Stengrund, 2001	İsveç	2	10	3-3.5 [29]	-	5 [13]	6-10 [13]
Horns Rev I, 2002	Danimarka	2	160	4 [27]	230 [30]	14-20 [30]	6-14 [30]
Frederikshavn, 2003	Danimarka	2.3-3	10.6	12* [50]	135* [50]	4 [51]	0.2 [51]
Samsø, 2003	Danimarka	2.3	23	4.5 [25]	300 [30]	3.5 [30]	20 [25]
Arklow Bank, 2003	İrlanda	3.6	25.2	5.2 [25,52]	280 [25,52]	10 [24]	10-25 [24]
North Hoyle, 2003	İngiltere	2	60	4 [30]	250 [30]	9.2 [39]	7-11 [39]
Enova, 2004	Almanya	4.5	4.5	-	-	0	2 [53]
Scroby Sands, 2004	İngiltere	2	60	4.2 [30]	200 [30]	3.6 [39]	5-10 [39]
Kentish Flats, 2005	İngiltere	3	90	4.3 [27,31]	247 [30]	9.8 [39]	5 [39]
Barrow, 2006	İngiltere	3	90	4.75 [27,31]	530 [30]	7 [54]	21-23 [54]
Egmond, 2007	Hollanda	3	108	4.6 [27]	250 [30]	10 [30]	10-18 [30]
Burbo Bank, 2007	İngiltere	3.6	90	4.7 [27,31]	400 [30]	8 [39]	2-8 [39]
P. Amalia, 2008	Hollanda	2	120	4 [27,30]	320 [30]	23 [30]	19-24 [30]
Lynn & I. Dowsing, 2009	İngiltere	3.6	194.4	4.74 [27]	225.5	6.2-6.9 [39]	6-13 [29]
Rhyl Flats, 2009	İngiltere	3.6	90	4.72 [27]	235 [30]	10.7 [39]	6.5-12.5 [39]

*Tekil-kova tipi temel

2000'li yılların ilk on yılında, açık deniz rüzgar türbinleri için en yaygın destek yapısı, 4-6 m çapındaki tekil kazık temeller olup, su altındaki gömülü uzunlukları yaklaşık 20-30 m'dir. Zemin koşullarına ve yüklerin büyüklüğüne göre, bu boyutlar ve ölçüler belirtilen aralıklar arasında değişmektedir [55]. Tablo 2'den görülebileceği gibi, açık deniz rüzgar enerjisi alanında teknolojinin gelişmesi ve ilerlemesi, kıydan 23 km uzaklıkta ve 24 metreye kadar su derinliklerinde tekil kazık temelli rüzgar türbinlerinin kurulumunu mümkün kılmıştır. Ayrıca, bu gelişmeler gelecekte kıydan daha uzakta ve daha derin sularda bu tipte uygulamaların yapılabilceği konusunda güven vermiştir.

1990'lı yıllarda Avrupa'da 2010 yılı sonuna kadar toplam 2.500 MW kurulu kapasiteye ulaşma hedeflenmiş olmasına rağmen [32], toplam kurulu açık deniz rüzgar enerjisi, 9 Avrupa ülkesinde kurulu olan 45 rüzgar çiftliği ile, 1990'larda öngörülen değeri aşarak, 2995 MW'a ulaşmıştır. 1341.2 MW kurulu kapasiteye sahip İngiltere, 2010 yılı sonunda 853.7 MW kurulu kapasiteye sahip Danimarka'nın önünde yer alarak kurulu açık deniz rüzgarı kapasitesindeki en büyük ülkeler listesinin başında gelmiştir. 2010 yılının sonunda toplamda 742 adet kurulu tekil kazık temel vardı, bu da toplam kurulu temel tiplerinin %65'ini oluşturmaktaydı [56].

2.3 2010'LAR

2010'larda, Almanya ve Belçika da açık deniz rüzgarından enerji üretmeye başlamıştır. Tablo 3'te açıkça görüldüğü gibi bu on yılda kurulan açık deniz rüzgar santrallerinin sayısında önemli bir artış vardır (>30). Avrupa'da açık deniz rüzgârından yararlanan ülkeler, bu kaynaktan faydalanarak daha fazla enerji üretmek için daha büyük rüzgar santralleri inşa etmeyi amaçlamıştır. Avrupa'da 2010'larda inşa edilmiş 30'dan fazla tekil temelli açık deniz rüzgar santrali olmasına rağmen (Bkz. Tablo 3), bu zaman diliminde dönüm noktası olarak düşünülebilecek rüzgar santralleri bu bölümde özetlenmiştir.

Tablo 3. 2010'lu yıllarda Avrupa'da kurulan tekil temelli açık deniz rüzgar santralleri

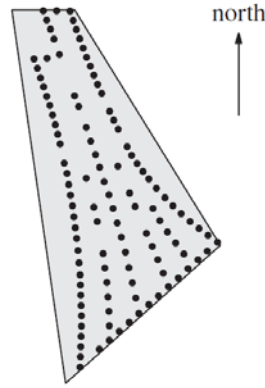
Rüzgar Santrali, İşletmeye Alındığı Yıl [24]	Ülke [24]	Türbin Kapasite esi (MW) [24]	Toplam Kapasite (MW) [24]	Kazık Çapı (m)	Kazık Ağırlığı (t)	Kıyıya Mesafe (km)	Su Derinliği (m)
Belwind, 2010	Belçika	3	165	5 [27,30,31]	550 [30]	46 [30]	15-24 [30]
Horns Rev II, 2010	Danimarka	2.3	209.3	3.9 [30]	280 [30]	30 [30]	9-17 [30]
Gunfleet Sands, 2010	İngiltere	3.6	172.8	5 [27,31]	423 [30]	7.4 [39]	0.5-10 [39]
Robin Rigg, 2010	İngiltere	3	174	4.3 [27]	310 [30]	11.5 [39]	4-13 [29]
Thanet, 2010	İngiltere	3	300	4.7 [27,31]	-	12 [57]	20-25 [57]
EnBW Baltic I, 2011	Almanya	2.3	48.3	4.3 [30]	215 [30]	16 [30]	16-19 [30]
Walney Phase I&II, 2011	İngiltere	3.6	367	6.5 [27,31]	806 [30]	14 [58]	23-30 [58]
Anholt, 2013	Danimarka	3.6	399.6	5.35 [27]	630 [30]	15-20 [30]	15-19 [30]
Greater Gabbard, 2013	İngiltere	3.6	504	6 [30]	700 [30]	26 [30]	20-32 [30]
Gunfleet Sands III, 2013	İngiltere	6	12	-	-	8 [5]	5-12 [5]
Lincs, 2013	İngiltere	3.6	270	5.2 [30]	480 [30]	8.5-16.3 [30]	6-8 [30]
London Array, 2013	İngiltere	3.6	630	4.7-5.7 [29,59]	650 [59]	20 [30]	0-25 [29]
Sheringham Shoal, 2013	İngiltere	3.6	316.8	4.3-5.7 [29]	375-530 [60]	17-23 [60]	17-22 [60]
Northwind, 2014	Belçika	3	216	5.2 [27]	-	37 [5]	15-23 [5]
Meerwind Süd/Ost, 2014	Almanya	3.6	288	5.5 [27]	-	54.4 [5]	22-26 [5]
Riffgat, 2014	Almanya	3.6	108	6 [30]	720 [30]	15-30 [30]	18-23 [30]
Teesside, 2014	İngiltere	2.3	62.1	4.6 [29]	160 [30]	1.5 [30]	8-22 [29]
West of D. Sands, 2014	İngiltere	3.6	389	5-6 [29]	-	15 [5]	17-21 [29]
Amrumbank West, 2015	Almanya	3.775	302	6 [30]	800 [30]	35 [30]	20-25 [30]
B. Riffgrund I, 2015	Almanya	4	312	5.9 [30]	495-684 [30]	54 [30]	29-29 [30]
Butendiek, 2015	Almanya	3.6	288	6.5 [27]	-	32 [61]	17-22 [61]
Dantysk, 2015	Almanya	3.6	288	6 [27]	730 [30]	69 [30]	21-31 [30]
EnBW Baltic II, 2015*	Almanya	3.6	288	6.5 [62]	927 [62]	32 [63]	23-44 [63]

Rüzgar Santrali, İşletmeye Alındığı Yıl [24]	Ülke [24]	Türbin Kapasite esi (MW) [24]	Toplam Kapasite (MW) [24]	Kazık Çapı (m)	Kazık Ağırlığı (t)	Kıyıya Mesafe (km)	Su Derinliği (m)
Eneco, 2015	Hollanda	3	129	5 [64]	525 [64]	23 [65]	18-24 [66]
Gwynt Mor, 2015	İngiltere	3.6	576	6 [27]	700 [30]	13-18 [30]	12-28 [30]
Humber Gateway, 2015	İngiltere	3	219	4.2 [29]	-	10 [5]	10-18 [29]
Westermest Rough, 2015	İngiltere	6	210	6.25 [29]	500-810 [67]	10 [5]	12-22 [29]
Kentish Flats II, 2015	İngiltere	3.3	49.5	5 [24]	223-260 [24]	8 [24]	3-5 [24]
Westermestwind, 2016	Hollanda	3	144	5 [68]	250 [68]	0.5-1.2 [68]	3-7 [69]
Nobelwind, 2017	Belçika	3.3	165	5 [70]	-	47 [70,71]	26-38 [71]
Gode Wind I&II, 2017	Almanya	6.264	582	7.5 [14]	940 [29]	45 [72]	28-34 [72]
Nordergründe, 2017	Almanya	6.15	110.7	5.5 [73]	370 [73]	15 [73]	10 [73]
Nordsee One, 2017	Almanya	6.15	332.1	-	-	45 [74]	28 [74]
Sandbank, 2017	Almanya	4	288	6.8 [75]	900 [75]	90 [75]	24-34 [75]
Veja Mate, 2017	Almanya	6	402	7.8 [76]	1302.5 [76]	95 [77]	40 [78]
Gemini, 2017	Hollanda	4	600	5.5-7 [27]	670-916 [79]	85 [80]	36 [80]
Dudgeon, 2017	İngiltere	6	402	7-7.4 [81]	800- 1200	35 [74]	12-24 [74]
Galloper, 2018	İngiltere	6	353	7.5 [82]	1200 [82]	27 [83]	27-36 [83]
Race Bank, 2018	İngiltere	6.3	573.3	-	-	27 [84]	12-22 [84]
Rampion, 2018	İngiltere	3.45	400.2	5.75-6.5 [85]	550-800 [85]	13-20 [86]	19-40 [87]
Walney Extension, 2018	İngiltere	7&8	659	-	500-970 [88]	19 [89]	20-37 [90]
Arkona, 2019	Almanya	6.417	385	7-7.75 [91]	1200 [91]	35 [92]	23-37 [93]
Rentel, 2019	Belçika	7.35	309	8 [94]	1250 [94]	32-40 [94]	22-36 [94]

*39 tekil kazık temel, 41 kafes tipi temel [63]

Anholt rüzgar santrali 2013 yılında Danimarka kıyılarından 15-20 km uzaklıkta ve 15-19 m su derinliğinde bir alana inşa edilmiştir [30]. Toplamda, her biri 3.6 MW olan 111 rüzgar türbini, tekil kazık temeller üzerine oturtulmuştur. 396,6 MW kapasiteli Anholt hala Danimarka'nın en büyük açık deniz rüzgar santrali olarak bilinmektedir. Bu rüzgar çiftliğinin yerleşim düzeni; deniz dibi koşullarını, sahaya özgü kazık tasarımını ve hakim rüzgar yönünü dikkate alarak optimizasyon çalışmasıyla verimli bir şekilde tasarlanmıştır. Yapılan optimizasyon çalışmasının sonunda, bölgede hakim rüzgar yönü ve 30 m'den daha derin yumuşak kil tabakası nedeniyle türbinlerin santral alanının batı-güneybatısında yoğun bir şekilde konumlandırıldığı yerleşim düzeni Şekil 8'de görülmektedir [14]. Denizlere dökülen kimyasallar, petrol atıkları veya kazık çakma işlemi esnasında ortaya çıkan gürültü gibi su altı yaşamını tehdit eden riskleri en aza indirerek çevresel etkileri azaltmak için kurulum ve işletme aşamalarında bazı önlemler alınmıştır. Bu önlemlere örnek olarak, kazık çakma işlemi sırasında, deniz canlılarını inşaat alanından uzak tutmak için bazı araçlar kullanılmış ve kurulum aşamasında gemi çarpışmalarını önlemek için çalışma alanının etrafına uyarı işaretleri yerleştirilmiştir. 2020 yılına kadar %30 yenilenebilir enerji kapasitesine ulaşmayı hedefleyen Danimarka hükümeti, bu rüzgar

santralinin 2013 yılında tamamlanmasıyla beraber bu yöndeki hedeflerinde düzenlemeler yapmış ve hedefi arttırmıştır [95].



Şekil 8. Anholt açık deniz rüzgar santralinin yerleşim düzeni [14]

2013 yılı, açık deniz rüzgar enerjisi endüstrisinde İngiltere için bir dönüm noktasıydı; çünkü dünyanın en büyük iki açık deniz rüzgar santrali olan, 177 tekil kazık temelli türbin (2 trafo merkezi) ile toplam 630 MW üretim kapasitesine sahip London Array ve 140 tekil kazık temelli türbin ile 504 MW üretim kapasitesine sahip Greater Gabbard inşa edilmiştir [96]. London Array, kıyıya 20 km mesafede [30] ve 0-25 m arasında değişen su derinliklerinde [29], Greater Gabbard ise kıyıya 26 km mesafede ve 20-32 m arasında değişen su derinliklerinde [30] kurulmuştur. Greater Gabbard rüzgar santralinin İngiltere’de kıyıya 20 km’den daha uzak bir mesafede kurulan ilk tekil kazık temelli rüzgar santrali olması, İngiltere’de açık deniz rüzgar enerjisi alanında teknolojik ilerlemeler açısından önemli bir gelişme olarak görülebilir [58]. Greater Gabbard projesi hedeflendiği gibi 2010 yılında tamamlanabilseydi, İngiltere’nin enerji ihtiyacının %10’unu yenilenebilir kaynaklardan karşılama hedefinin yarısını karşılayacaktı [97]. London Array’in o zamanın teknolojisi düşünüldüğünde kıyıdan bu kadar uzakta kurulmasının yanı sıra, şiddetli rüzgarların ve beklenmedik dalgaların meydana gelebileceği bu alanda projeyi inşa etmek çok zordu. Bu nedenle, kurulum aşamasında kaza olmamasını sağlamak amacıyla en son teknoloji ve ekipman kullanılmıştır. Daha önceki projelerden farklı olarak, her bir kazık sahadaki konumuna göre ayrı ayrı tasarlanmış ve tekil temelleri kurmak için iki farklı gemi kullanılmıştır, çünkü bölgede 25 m’ye kadar ulaşabilen gelgitler meydana gelmektedir. En fazla 40 m su derinliğinde çalışabilen MPI Adventure derin sularda, modern bir jack up duba olan A2Sea Sea Worker ise sığ sularda kazık kurulumu aşamasında kullanılmıştır. Çevre koşullarının daha sert olduğu yerlerde, bu iki gemi yetersiz kaldığı için birkaç kazığın kurulumunda HLV Savenen isimli başka bir gemi kullanılmıştır. Sabit bir platform oluşturmak ve bu platformdaki kazıkları çakmak için, gemiler dört adet uzatılabilir ayak kullanılarak deniz suyu üzerine kaldırıldı. Tekil kazık temellerin üzerine monte edilmiş, üzerinde bakım çalışmalarına olanak sağlayan merdiven ve platformları olan geçiş parçaları, denizde bulunan bu yapıların uzaktan kolayca görülebilmesi ve tanımlanması için sarıya boyanmıştır. Yukarıda belirtilen zorlu işler nedeniyle her bir tekil kazık temel ortalama bir ila iki günde kurulmuştur [98].

Westermeerwind, Hollanda kıyılarında inşa edilen en büyük açık deniz rüzgar santralidir. Bölgedeki uygun rüzgar potansiyelinin yanı sıra, çevrenin doğal güzelliği bozulmak istenmediği için, bu rüzgar santrali Şekil 9’da görülebileceği gibi yakın kıyıya (0.5-1.2 km) kuruldu. Kurulum alanında su derinliği çok sığ olduğu için nakliye ve montaj işlerinde kullanılan büyük gemiler bölgeye girememektedir. Bu nedenle 250 ton ağırlığında ve 5 m çapında 48 adet çelik tekil kazık temel gemi ile kurulum alanına birer birer taşındı ve özel tasarlanmış dubalar ile kuruldu. Tekil temellerin montaj işleri haftada 6 gün çalışmayla 3 ayda tamamlandı. Karada kurulu NOP Agrowind ve Zuidwester rüzgar santralleri ile birlikte, 2018’de işletmeye alınan Westermeerwind rüzgar santrali, Hollanda’nın en büyüğü olan Nooldoostpolder rüzgar çiftliğini oluşturur [99].



Şekil 9. Westermeerwind rüzgar santraliniin kurulumu [99]

Veja Mate rüzgar santrali, 2017 yılında Almanya'nın Kuzey Denizi kıyılarında kurulmuştur. Tekil kazık temeller üzerine kurulu türbinlerle toplam 402 MW gücünde enerji üretimi planlanan [78] bu rüzgar santrali Borkum Adası'na 95 km mesafede, 40 m su derinliğinde, düzenli ve güçlü rüzgarların estiği bir alanda kuruludur [77]. 7.8 m çapında (Bkz. Şekil 10-a ve Şekil 10-b) ve 1302,5 ton ağırlığındaki toplam 67 tekil kazık temel [76], dünyada şimdiye kadar üretilen en ağır tekil kazık temelleriydi [30]. Temellerin ve geçiş parçalarının imalatında kullanılacak 100.000 ton çelik, tasarımcı ve imalatçının iş birliği içinde çalışmasıyla kısa sürede elde edildi. Bu ağır ve XXL tekil kazık temellerin (yaklaşık 7 m çapında [100]) kurulum aşamasında, dünyanın en büyük kendiliğinden hareket eden jack up kurulum gemisi olan ve 1500 tona kadar kaldırma kapasiteli SeaJacks Scylla, kullanılmıştır. Bu derin sularda zamanın en büyük tekil kazık temellerinin deniz tabanına yerleştirilmesi için, dünyanın en büyük kazık çekici kullanılmıştır. Ancak, Alman yetkililer tarafından belirlenen gürültü sınırlamalarına uymak için bir gürültü azaltma sistemine ihtiyaç vardı. Bu nedenle, su altındaki ses seviyesini 160 dB'nin altında tutmak için ses düşürücü bir sistem olan HSD sistemi ve çift büyük kabarcık perdesi kullanılmıştır [101]. Bunun yanında yaşanan diğer bir zorluk ise, rüzgar santraliniin kıyıya olan mesafesinin, inşaat ve işletme aşamalarında çalışmayı zorlaştırmasıydı [102].



(a)



(b)

Şekil 10. Veja Mate rüzgar santralinde kullanılan tekil temeller (a) [30]; (b) [101]

Gemini rüzgar santrali, kıyıya 85 km mesafede 2017 yılında Hollanda'da kurulmuştur. Santralin kurulum alanında su derinliği 28-36 m arasında değişmekteydi. Tekil kazık temellerle desteklenen her biri 4 MW kapasiteli toplam 150 türbine sahip olan bu santral toplam 600 MW kurulu güce sahiptir [24]. Tasarım aşamasında, destek yapısı olarak tekil kazık temeller veya kafes tipi temellerin kullanımı ele alınmıştır. Bu iki alternatifin kendilerine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Örnek olarak, tekil kazık temellerin imalatında daha fazla çelik, fakat daha az iş gücü gerekirken, kafes tipi temellerin yapısal bileşenlerinin birlikte kaynaklanması gerekmektedir ve bakım maliyeti tekil kazık temellerden daha yüksektir. Ayrıca, projenin ana yüklenicisi, tekil kazık temel kurulumu ile ilgili daha fazla deneyime sahipti ve tüm gemileri tekil kazık temel kurulumu için uygundu. Tekil kazık temellerin kurulumu kafes tipi temellere kıyasla daha kolaydır ve tekil kazık temellerin bir diğer avantajı da gemide daha az yer kaplaması nedeniyle taşıma kolaylığı sağlayarak nakliye işlemini hızlandırmasıdır. Tekil kazık temelleri taşıyan gemi santralin kurulacağı alana ulaştığında, Aeolus gemisi GPS yardımıyla her bir kazık için koordinatları belirledikten sonra, ikinci bir vinçle desteklenen Aeolus ana vinciyle gemiden alınıp dikey pozisyona getirilen kazıklar darbeli çekiç tarafından deniz tabanına çakılmadan önce kurulu olacağı konum santimetre hassasiyetinde hatasız şekilde ayarlanmıştır [103].

Rampion, kıyından 13 km uzaklıkta ve 19-40 m arasında değişen su derinliğine sahip bir alanda 2018 yılında İngiltere'de inşa edilmiş bir açık deniz rüzgar santralidir. Her biri 3.45 MW kapasiteli toplam 116 rüzgar türbini, çapı 5.76-6.5 m arasında değişen 800 tonluk tekil kazık temellerle desteklenmiştir. Bu 116 tekil kazık temelin her biri, su derinliği ve deniz tabanı zemin koşulları gibi sahaya özgü durumlar dikkate alınarak tasarlanmıştır [85]. Karagöz balıklarının yumurtlama mevsimi süresince inşaat işleri durdurulmuş olmasına rağmen, tekil kazık temellerin kurulumunda kullanılan iki geminin, MPI Discovery ve Pacific Orca, sürekli çalışması sayesinde santralin kurulumu planlanan zamanda tamamlanmıştır [104].

Walney Extension rüzgar santralinde, London Array'de kurulu türbinlerin yarısından daha az sayıda türbin olmasına rağmen, Walney Extension 659 MW kurulu güç kapasitesiyle, London Array'den daha fazla toplam güç kapasitesine ulaşmıştır [105]. Yani, dünyanın en büyük kapasiteli açık deniz rüzgar santrali olan, 40 adet MHI Vestas V164-8.0-MW ve 47 adet Siemens Gamesa SWT-7-MW-154 rüzgar türbininden oluşan [106] Walney Extension, aynı bölgede inşa edilen Walney I ve Walney II rüzgar santralleri de dahil olmak üzere Walney açık deniz rüzgar santrali projesinin bir parçası olarak 2018 yılında İngiltere'nin İrlanda Denizi kıyılarında kurulmuştur [106,107]. Bu rüzgar santralinin inşası, birincisi Vestas türbinlerinin, ikincisi ise Siemens türbinlerinin kurulumu olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Tüm türbinler tekil kazık temellerle desteklenmiştir [107]. Bu rüzgar santralinde destek yapısı olarak kullanılan kazıklar, Gemini ve London Array rüzgar santralinin kurulumunda da kullanılan Aeolus ve Svanen gemileri tarafından taşınmış ve kurulmuştur [108].

Rentel rüzgar santrali, Belçika'da kurulan 5. rüzgar santralidir. 2019 yılında işletmeye alınan bu santral Kuzey Denizi'nde kurulmuştur. Toplamda 42 adet 7.35 MW kapasiteli D7 Siemens rüzgar türbini, 1.250 ton ağırlığa sahip olan ve 8 m çapındaki dünyanın en büyük tekil kazık temelleri üzerine kurulmuştur. Santralde bir adet transformatör bulunmaktadır. Bu transformatörün üzerinde bulunduğu platformu destekleyen tekil temelin Kuzey Denizi'nin zorlu koşullarında 20-22 senelik beklenen kullanım ömrü süresince gereken rijitliği sağlaması için deniz tabanının 40 m altına gömülmüştür. Bu yüzden, transformatör temeli 1.850 tona kadar ulaşan ve türbin temellerinden farklı boyutlara sahip olan bir yapıya sahiptir [94].

2010'lu yıllarda, önceki yıllara kıyasla daha büyük ve daha fazla açık deniz rüzgar türbini kurulmuştur. Bu on yılın sonlarına gelindiğinde, kıyından 95 km uzaklıkta ve 40 m'den daha derinlerde rüzgar türbini kurulumu mümkün hale gelmiştir. Bugüne kadarki teknolojik ilerlemelere bakarak, gelecek dönemlerde yaşanacak gelişmelerle 8 m'den daha geniş çapta ve 1.300 tondan daha ağır tekil kazık temellerin üretilebilir ve uygulanabilir hale geleceği söylenebilir.

3. SONUÇ

Artan sera gazı salınımını azaltmayı amaçlayan Kyoto Protokolü (1997) ve Paris Anlaşması (2015), özellikle Avrupa ülkelerinde enerji üretimi için açık deniz rüzgarı gibi yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır. Avrupa'daki kurulu açık deniz rüzgar santralleri, %84 gibi büyük bir oranla tüm dünyadaki açık deniz rüzgar santrallerinin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır. Kurulu açık deniz rüzgar türbinleri, Avrupa kıta sahanlığında tekil tip destek yapılarının uygunluğu ve bu tipin Avrupa'nın deniz tabanı koşullarında kurulmasının kolaylığından dolayı çoğunlukla tekil temellerle desteklenmiştir. Açık denizde kurulan ilk rüzgar türbinleri, çapları 2-4 m arasında değişen ve 100 tondan daha hafif tekil kazık temellerle desteklenmiştir. Bu türbinler su derinliğinin en fazla 10 m olduğu ve kıyıdan uzaklığın 4 km'den fazla olmadığı bölgelerde kurulurken, mevcut kurulu tekil kazık temelli açık deniz rüzgar türbinlerinde, gelişen teknoloji sayesinde kıyıdan 95 km mesafeye ve 45 m su derinliğine ulaşılmıştır. Son dönemlerde yapılan kurulumlarda, yine gelişen teknoloji sayesinde, 8 m çapında ve 1300 ton ağırlığındaki tekil kazık temellerin üretilmesi ve kurulmasının uygun olduğu bir noktaya ulaşılmıştır. İlk açık deniz rüzgar türbininin kapasitesi 220 kW iken, şu anda 8 MW kapasiteli türbin kurulabilmektedir. Ayrıca, artan enerji ihtiyacı, gelişen teknoloji ve ülkelerin açık deniz rüzgar enerjisine artan ilgisiyle beraber rüzgar santrallerinin sayısı ve kapasitesi giderek artacaktır.

Kurulumu gerçekleştirilen ilk açık deniz rüzgar türbinleri bu sistemlerin performansını test etmek amacıyla kurulmuştur. Kurulum aşamasında, öngörülemeyen ve maliyeti artıran sorunlarla karşılaşmış ve bu sorunlara karşı bazı çözümler geliştirilmiştir. Bu sorunlardan edinilen deneyimler sayesinde aynı sorunların tekrar ortaya çıkmaması için bazı önlemler alınmıştır. Kurulum aşamasında ve sonrasında, bölgedeki sualtı yaşamını gözlemlemek için çok sayıda araştırma yapılmıştır ve bu araştırmalar sonucunda getirilen kısıtlamalara uymak için teknoloji bu yönde gelişmiştir. Günümüzde, enerji yatırımcıları sert hava koşullarında yaşanabilecek iş kazalarını göz önünde bulundurarak en son teknolojiyi kullanıp riski en aza indirmeyi hedeflemektedir.

Karşılaşılan zorlukların bir sonucu olarak edinilen deneyimler teknolojiyi geliştirmiştir ve bu deneyimler açık deniz rüzgar endüstrisine yeni girenler için oldukça faydalı olacaktır. Bu nedenle, yazarlar, teknik anlamda daha derin bir bakış açısına sahip olmak için Avrupa'daki tekil temelli açık deniz rüzgar türbinlerinin gelişimini ele alarak gelecekteki çalışmalar için gerekli tüm iyileştirmelerin önemini vurgulamayı amaçlamıştır.

KAYNAKLAR

- [1] P. Higgins, A.M. Foley, Review of Offshore Wind Power Development in the United Kingdom, in: 2013 12th Int. Conf. Environ. Electr. Eng., IEEE, 2013: pp. 589–593. doi:10.1109/EEEIC.2013.6549584.
- [2] What is the Kyoto Ptorocol? | UNFCCC, (n.d.). <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol/what-is-the-kyoto-protocol>.
- [3] UNFCCC, (n.d.). <https://unfccc.int/>.
- [4] Falkner R., The Paris Agreement and the new logic of international climate politics, Int. Aff. 92 (2016) 1107–1125. https://static1.squarespace.com/static/538a0f32e4b0e9ab915750a1/t/57d3dfc646c3c43b079d1c59/1473503175245/Falkner_2016_TheParisAgreement.pdf.
- [5] K.Y. Oh, W. Nam, M.S. Ryu, J.Y. Kim, B.I. Epureanu, A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives, Renew. Sustain. Energy Rev. 88 (2018) 16–36. doi:10.1016/j.rser.2018.02.005.
- [6] A.R. Henderson, C. Morgan, B. Smith, H.C. Sørensen, R.J. Barthelmie, B. Boesmans, Offshore Wind Energy in Europe - A Review of the State-of-the-Art, Wind Energy. 6 (2003) 35–52. doi:10.1002/we.82.

- [7] B.C. O’Kelly, M. Arshad, Offshore wind turbine foundations - analysis and design, Elsevier Ltd, 2016. doi:10.1016/B978-0-08-100779-2.00020-9.
- [8] M. Bilgili, A. Yasar, E. Simsek, Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 905–915. doi:10.1016/j.rser.2010.11.006.
- [9] J.G. Dedecca, R.A. Hakvoort, J.R. Ortt, Market strategies for offshore wind in Europe: A development and diffusion perspective, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 66 (2016) 286–296. doi:10.1016/j.rser.2016.08.007.
- [10] S. Malhotra, Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundations, in: I.H. Al-Bahadly (Ed.), *Wind Turbines*, 2011: pp. 231–264. doi:10.5772/32009.
- [11] D. Lombardi, S. Bhattacharya, D.M. Wood, Dynamic soil-structure interaction of monopile supported wind turbines in cohesive soil, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 49 (2013) 165–180. doi:10.1016/j.soildyn.2013.01.015.
- [12] B.W. Byrne, R. McAdam, H.J. Burd, G.T. Houlsby, C.M. Martin, L. Zdravković, D.M.G. Taborda, D.M. Potts, R.J. Jardine, M. Sideri, F.C. Schroeder, K. Gavin, P. Doherty, D. Igoe, A.M. Wood, D. Kallehave, J. Skov Gretlund, New design methods for large diameter piles under lateral loading for offshore wind applications, in: 3rd Int. Symp. Front. Offshore Geotech. (ISFOG 2015), Oslo, Norw., 2015: pp. 10–12. doi:10.1201/b18442-96.
- [13] N. Nikolaos, Deep water offshore wind technologies, Thesis of Master in Science, University of Strathclyde Department of Mechanical Engineering, 2004. [http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc 2004/nikolaos.pdf](http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc%2004/nikolaos.pdf).
- [14] D. Kallehave, B.W. Byrne, C. LeBlanc Thilsted, K.K. Mikkelsen, Optimization of monopiles for offshore wind turbines, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 373 (2015). doi:10.1098/rsta.2014.0100.
- [15] X. Wu, Y. Hu, Y. Li, J. Yang, L. Duan, T. Wang, T. Adcock, Z. Jiang, Z. Gao, Z. Lin, A. Borthwick, S. Liao, Foundations of offshore wind turbines : A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 104 (2019) 379–393. doi:10.1016/j.rser.2019.01.012.
- [16] GWEC Global Wind 2017 Report | A Snapshot of Top Wind Markets in 2017: Offshore Wind, 2017.
- [17] M. DeCastro, S. Salvador, M. Gómez-Gesteira, X. Costoya, D. Carvalho, F.J. Sanz-Larruga, L. Gimeno, Europe , China and the United States : Three different approaches to the development of offshore wind energy, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 109 (2019) 55–70. doi:10.1016/j.rser.2019.04.025.
- [18] WindEurope, Offshore Wind in Europe - Key Trends and Statistics 2018, n.d. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2018.pdf>.
- [19] C. İlkiliç, H. Aydın, Wind power potential and usage in the coastal regions of Turkey, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 44 (2015) 78–86. doi:10.1016/j.rser.2014.12.010.
- [20] TURKISH WIND ENERGY STATISTIC REPORT 2019, 2019.
- [21] M. Satir, F. Murphy, K. McDonnell, Feasibility study of an offshore wind farm in the Aegean Sea , Turkey, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 (2018) 2552–2562. doi:10.1016/j.rser.2017.06.063.
- [22] Y. Malkoc, The Role of Wind energy in Turkish Electric Energy Supply, *Chamb Electr Eng Turkey Energy J.* 3 (2007) 45–50.
- [23] Strengthened Danish-Turkish relations on offshore wind energy, (n.d.). <http://tyrkiet.um.dk/da/nyheder/newsdisplaypage/?newsid=e8b3e389-ad43-47a4-a385-fdaae06711f2>.
- [24] Global Offshore Wind Farms Database - 4C Offshore, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/>.
- [25] M.B. Zaaijer, A.R. Henderson, Review of current activities in offshore wind energy, Fourteenth Int. Offshore Polar Eng. Conf. (2004).
- [26] The world’s first offshore wind farm is retiring, (2017). <https://orsted.com/en/Media/Newsroom/News/2017/03/The-worlds-first-offshore-wind-farm-is-retiring>.

- [27] S. Bhattacharya, Design of Foundations for Offshore Wind Turbines, Wiley, 2019.
- [28] B. Lange, E. Aagaard, P.-E. Andersen, A. Møller, S. Niklasson, A. Wickman, Offshore Wind Farm Bockstigen: Installation and Operation Experience, EWEC Conf. (1999) 300–303.
- [29] O.B. Leite, REVIEW OF DESIGN PROCEDURES FOR MONOPILE OFFSHORE WIND STRUCTURES, Thesis of Master in Science, University of Porto Department of Civil Engineering, 2015.
- [30] V. Negro, J.-S. López-Gutiérrez, M.D. Esteban, P. Alberdi, M. Imaz, J.-M. Serraclara, Monopiles in offshore wind: Preliminary estimate of main dimensions, Ocean Eng. 133 (2017) 253–261. doi:10.1016/j.oceaneng.2017.02.011.
- [31] L. Arany, S. Bhattacharya, J.H.G. Macdonald, S.J. Hogan, Closed form solution of Eigen frequency of monopile supported offshore wind turbines in deeper waters incorporating stiffness of substructure and SSI, Soil Dyn. Earthq. Eng. 83 (2016) 18–32. doi:10.1016/j.soildyn.2015.12.011.
- [32] R.J. Barthelmie, A Brief Review of Offshore Wind Energy Activity in the 1990s, Wind Eng. 22 (1998) 265–273.
- [33] M. Kühn, P.W. Cheng, H. Bergström, J.-åke Dahlberg, J. Duffy, J. Jacquemin, T. Thiringer, P. Passon, J. Pettersson, Utgrunden Offshore Wind Farm : Results of 5 Years of Operation and Research, Copenhagen Offshore Wind. (2005).
- [34] The first decommission in the world of an offshore wind farm is now completed - Vattenfall, (2016). <https://corporate.vattenfall.com/>.
- [35] J.R. Kristoffersen, The Horns Rev wind farm and the operational experience with the wind farm main controller, Copenhagen Offshore Wind. (2005).
- [36] P.A. Østergaard, H. Lund, A renewable energy system in Frederikshavn using low-temperature geothermal energy for district heating, Appl. Energy. 88 (2011) 479–487.
- [37] A. Westwood, Refocus Marine Renewable Energy Report: Global Markets, Forecasts and Analysis 2005-2009, Elsevier, 2005.
- [38] DTI, 2nd DTI Operating Report - Capital Grant Scheme for the North Hoyle Offshore Wind Farm, 2006.
- [39] Q.Y. Feng, P.J. Tavner, H. Long, Early experiences with UK round I offshore wind farms, Proc. Inst. Civ. Eng. Energy. 163 (2010) 167–181. doi:10.1680/ener.2010.163.0.1.
- [40] H. Park, C.E. Vincent, Evolution of Scroby Sands in the East Anglian coast , UK, J. Coast. Res. (2007) 868–873.
- [41] R.J. Whitehouse, J.M. Harris, J. Sutherland, J. Rees, The nature of scour development and scour protection at offshore windfarm foundations, Mar. Pollut. Bull. 62 (2011) 73–88. doi:10.1016/j.marpolbul.2010.09.007.
- [42] J. Ress, P. Larcombe, C. Vivian, A. Judd, Scroby Sands Offshore Wind Farm – Coastal Processes Monitoring, Final Rep. Dep. Trade Ind. Proj. Code AE0262, Cefas, Lowestoft. (2006).
- [43] Capital Grant Scheme for Offshore Wind Annual Report: January 2006 - December 2006, 2007.
- [44] M. Scheidat, J. Tougaard, S. Brasseur, J. Tougaard, J. Carstensen, T. van Polanen Petel, J. Teilmann, P. Reijnders, Harbour porpoises (Phocoena phocoena) and wind farms: a case study in the Dutch North Sea, Environ. Res. Lett. 6 (2011). doi:10.1088/1748-9326/6/2/025102.
- [45] P.A. Fleming, A. Ning, P.M.O. Gebraad, K. Dykes, Wind Plant System Engineering through Optimization of Layout and Yaw Control, Wind Energy. 19 (2016) 329–344. doi:10.1002/we.1836.
- [46] Princess Amalia windfarm - Mott MacDonald, (n.d.). <https://www.mottmac.com/article/2367/princess-amalia-windfarm>.
- [47] M. Dähne, A. Gilles, K. Lucke, V. Peschko, S. Adler, K. Krügel, J. Sundermeyer, U. Siebert, Effects of pile-driving on harbour porpoises (Phocoena phocoena) at the first offshore wind farm in Germany, Environ. Res. Lett. 8 (2013) 1–16. doi:10.1088/1748-9326/8/2/025002.

- [48] Lynn and Inner Dowsing Offshore Wind Farms, (2009). http://www.cargos-paquebots.net/Revue de presse/0000_IMAGES-07/117-Eoliennes_P&O.pdf.
- [49] L. Pepper, Monitoring and evaluation of Blyth offshore wind farm - Installation and Commissioning, 2001. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20163732>.
- [50] Frederikshavn - Universal Foundation, (n.d.). <https://universal-foundation.com/case-studies/frederikshavn/>.
- [51] F. Villalobos, Model Testing of Foundations for Offshore Wind Turbines, Doctor of Philosophy, University of Oxford, 2006.
- [52] A. Moller, Efficient Offshore Wind Turbine Foundations, *Wind Eng.* 29 (2006) 463–469.
- [53] ENOVA Offshore Project Ems Emden Offshore Wind Farm, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/enova-offshore-project-ems-emden-germany-de77.html>.
- [54] S. Breton, G. Moe, Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America, *Renew. Energy*. 34 (2009) 646–654. doi:10.1016/j.renene.2008.05.040.
- [55] A.H. Augustesen, K.T. Brodbæk, M. Møller, S.P.H. Sørensen, L.B. Ibsen, T.S. Pedersen, L.V. Andersen, Numerical Modelling of Large-Diameter Steel Piles at Horns Rev, *Proc. 12th Int. Conf. Civil, Struct. Environ. Eng. Comput.* (2009).
- [56] The European Wind Energy Association, The European offshore wind industry key trends and statistics 2010, n.d. http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/20110121_Offshore_stats_Full_Doc_final.pdf.
- [57] E. Uraz, Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses, Thesis of Master in Science, Gotland University Department of Wind Energy, 2011.
- [58] P. Higgins, A. Foley, The evolution of offshore wind power in the United Kingdom, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37 (2014) 599–612. doi:10.1016/j.rser.2014.05.058.
- [59] J. Zhang, I. Fowai, K. Sun, A glance at offshore wind turbine foundation structures, *Brodogr. Teor. i Praksa Brodogr. i Pomor. Teh.* 67 (2016) 101–113. doi:10.21278/brod67207.
- [60] Sheringham Shoal Offshore Wind Farm, Scira Offshore Energy. (n.d.). <http://sheringhamshoal.co.uk/newsdownloads/Downloads/Sheringham Shoal Factsheet Sept 2010.pdf>.
- [61] Butendiek offshore wind farm factsheet, (n.d.). <https://www.ewz.ch/content/dam/ewz/services/dokumentencenter/ueber-ewz/dokumente/factsheet-butendiek-2016-e.pdf>.
- [62] Baltic 2 Offshore Wind Farm, (n.d.). <https://www.ballast-nedam.com/projects/baltic-2-offshore-wind-farm/>.
- [63] Wind farm in the Baltic Sea: EnBW Baltic 2, (n.d.). <https://www.enbw.com/renewable-energy/wind-energy/our-offshore-wind-farms/baltic-2/>.
- [64] H. Abolhadi, Support Policy Instruments for Offshore Wind Power in the Netherlands, Delf University of Technology, 2017.
- [65] Eneco Luchterduinen wind farm, (n.d.). <https://www.eneco.nl/over-ons/projecten/windpark-luchterduinen/#locatiekeuze>.
- [66] Eneco Luchterduinen Wind Farm, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/eneco-luchterduinen-netherlands-nl32.html>.
- [67] P. Smith, Westernmost Rough foundations completed, (2014). <https://www.windpoweroffshore.com/article/1295923/westernmost-rough-foundations-completed>.
- [68] Manufacturing and driving of 48 foundation piles, (n.d.). <http://www.westermeerwind.nl/en/construction/manufacturing-and-driving-of-48-foundation-piles/>.
- [69] Westermeerwind Wind Farm, (n.d.). <https://www.power-technology.com/projects/westermeerwind-wind-farm/>.
- [70] JDN, JDN Annual Report, 2017. <https://www.jandenul.com/sites/default/files/annual->

- report/attachments/Annual_Report_2017.pdf.
- [71] Nobelwind - DETAILS, (n.d.). <http://www.nobelwind.eu/#details>.
 - [72] Gode Wind 1+2 - 97 XL offshore foundations, (2016).
https://www.bladt.dk/UserFiles/05_Downloads/Foundations/Gode_Wind_12_Blaa_bjaelke_Low.pdf.
 - [73] AMBAU produces 18 monopiles and transition pieces for the Nordergründe Wind Farm, (2015). http://ambau.com/uploads/media/AMBAU_PI_002-2015_Nordergruende_en_01.pdf.
 - [74] A.G. Gonzalez-Rodriguez, Review of offshore wind farm cost components, *Energy Sustain. Dev.* 37 (2017) 10–19. doi:10.1016/j.esd.2016.12.001.
 - [75] OFFSHORE WIND FARM SANDBANK, (2016). <https://www.menck.com/news/11-news/179-offshore-wind-farm-sandbank>.
 - [76] EEW SPC produces 1st giant monopile for 402-MW Veja Mate wind park, *SeeNews Renewables*. (2016). <https://www.emis.com/php/search/doc?dcid=521022710&ebSCO=1?>
 - [77] Veja Mate Offshore Project GmbH About Us, (n.d.). <http://www.vejamate.net/#aboutus>.
 - [78] P. Passon, K. Branner, S.E. Larsen, J. Hvenekær Rasmussen, Offshore Wind Turbine Foundation Design - Selected Topics from the Perspective of a Foundation Designer, Thesis in Doctor of Philosophy, Technical University of Denmark Department of Wind Energy, 2015.
 - [79] Investor Presentation, (2015). http://northlandpower.com/cmsAssets/docs/pdfs/InvestorPresentation/NorthlandInvestorPresentation_October.pdf.
 - [80] DILLINGER, STEEL IS THE VITAL INGREDIENT - Solutions in Steel for Offshore Wind Energy Installations, (n.d.). <https://www.dillinger.de/d/downloads/download/5995>.
 - [81] Dudgeon Offshore Wind Farm - Power Technology | Energy News and Market Analysis, (n.d.). <https://www.power-technology.com/projects/dudgeon-offshore-wind-farm/#targetText=Each+turbine+has+a+rotor,weighing+between+800t-1%2C200t>.
 - [82] Year ends on a high for Galloper as foundation construction starts, (2017). <http://www.galloperwindfarm.com/year-ends-on-a-high-for-galloper-as-foundation-construction-starts/>.
 - [83] Facts & Figures, (n.d.). <http://www.galloperwindfarm.com/about/#facts-figures>.
 - [84] Race Bank Offshore Wind Farm foundation T&I and scour protection, (n.d.). <https://www.deme-group.com/geosea/references/race-bank-offshore-wind-farm-foundation-ti-and-scour-protection>.
 - [85] Steel monopile foundations | Rampion Offshore Wind, (n.d.). <https://www.rampionoffshore.com/wind-farm/components/foundations/>.
 - [86] The south coast's first offshore wind farm | Rampion Offshore Wind, (n.d.). <https://www.rampionoffshore.com/>.
 - [87] Rampion Wind Farm, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/rampion-united-kingdom-uk36.html>.
 - [88] Van Oord's topduo Aeolus en Svanen klaren klus Walney Extension offshore windpark - LINK, (n.d.). <https://www.linkmagazine.nl/oords-topduo-aeolus-en-svanen-klaren-klus-walney-extension-offshore-windpark/>.
 - [89] Walney Extension makes UK wind farm world's largest, (2018). <https://www.theengineer.co.uk/walney-extension-worlds-largest/>.
 - [90] Walney Extension Wind Farm, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/walney-extension-united-kingdom-uk63.html>.
 - [91] First monopile was loaded at the quay of the Rostock foundation manufacturer EEW SPC for the offshore wind farm Arkona, (n.d.). <https://eew-group.com/about/news/detail/eew-spc-loads-first-monopile-for-arkona/>.
 - [92] Ongoing project Arkona - 60 transition pieces and monopiles, 2017. https://www.bladt.dk/UserFiles/05_Downloads/Foundations/ONGOING_Arkona_Ongoing_verII.pdf.
 - [93] Arkona Wind Farm, (n.d.). <https://www.4coffshore.com/windfarms/arkona-germany-de46.html>.
 - [94] Rentel Offshore Wind Farm | The Project, (n.d.). <https://www.rentel.be/en>.

- [95] L.-F. Pau, Anholt Offshore Wind Farm, 2015. http://www.mega-project.eu/assets/exp/resources/Anholt_offshore_Wind_Farm.pdf.
- [96] A.H. Day, A. Babarit, A. Fontaine, Y.-P. He, M. Kraskowski, M. Murai, I. Penesis, F. Salvatore, H.-K. Shin, Hydrodynamic modelling of marine renewable energy devices: A state of the art review, *Ocean Eng.* 108 (2015) 46–69. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.05.036.
- [97] N.J. Brookes, A megaproject case study: The Greater Gabbard Wind Farm, n.d.
- [98] London Array | Offshore Construction, (n.d.). <http://www.londonarray.com/the-project-3/offshore-construction/>.
- [99] Westermeerwind - A wind farm for and by the Polder, (n.d.). <http://www.westermeerwind.nl/en/>.
- [100] XL Monopiles, (n.d.). http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/14-15/XL_Monopiles/introduction.html.
- [101] Boskalis, Veja Mate Offshore Wind Farm Project Sheet, n.d.
- [102] Project Finance International EMEA Report: VEJA MATE SCORES A GERMAN HAT TRICK, n.d.
- [103] M. Haang, A. Drenthe, eds., *Living on Wind Gemini Wind Park, Gemini Wind Park*, n.d.
- [104] C. Tomlinson, Media release - Foundation installation completed on schedule at Rampion, (2016) 1–2. [https://www.eonenergy.com/About-eon/our-company/generation/planning-for-the-future/wind/offshore/~/_media/ContentEditors/ECR/Rampion/Public Communication Documents/1703 First turbine media release.pdf](https://www.eonenergy.com/About-eon/our-company/generation/planning-for-the-future/wind/offshore/~/_media/ContentEditors/ECR/Rampion/Public%20Communication%20Documents/1703%20First%20turbine%20media%20release.pdf).
- [105] A. Vaughan, World's largest offshore windfarm opens off Cumbrian coast, *Environ. \ Guard.* (2018). <https://www.theguardian.com/environment/2018/sep/06/worlds-largest-offshore-windfarm-opens-cumbrian-coast-walney-extension-brexite>.
- [106] World's largest offshore wind project online | Windpower Offshore, (n.d.). <https://www.windpoweroffshore.com/article/1492066/worlds-largest-offshore-wind-project-online>.
- [107] Walney Extension Offshore Wind Farm, United Kingdom - Power Technology, *Energy News Mark. Anal.* (2019). <https://www.compelo.com/energy/projects/walney-extension-offshore-wind-farm/>.
- [108] Turbine foundations up at 659-MW Walney Extension, *SeeNews Renewables.* (2017). <https://www.emis.com/php/search/doc?dcid=585276756&ebsco=1?>